

方向に感度を持つ暗黒物質探索実験 NEWAGE

京都大学 大学院理学研究科

中村 輝石

nakamura@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

神戸大学 大学院理学研究科

身内 賢太郎

miuchi@panda.kobe-u.ac.jp

2013 年（平成 25 年）2 月 15 日

プロローグ：2006 年 地中海

2006 年 9 月, ギリシャ・ロードス島。地中海の美しい海と空, ギリシャ・ローマ時代の遺跡の残るこの島で, IDM 2006¹が開かれた。2006 年当時, ガス検出器を用いた暗黒物質探索実験は英国の DRIFT グループが検出器開発を進めているのみの「独占」状態で, 国際競争を伴う本格的な開発はまだ遠い先のものと思われていた。そんな中, 本稿の筆者のひとりである身内は IDM 2006 で NEWAGE 実験の現状報告として図 1 の「スカイマップ²」を初めて示すことで「宣戦布告」, DRIFT グループのリーダーと議論を開始し, 世界的コミュニティを立ち上げた。フランス・米国などのグループを合わせて, 「CYGNUS³」という名の下で, 方向に感度を持つ暗黒物質探索の世界的な競争と協力が始まった。

本稿は第 4 章を中村がその他を身内が担当し, 高エネルギーニュース初登場となる NEWAGE の, これまでの軌跡と将来計画を中心に紹介した。暗黒物質探索実験になじみのない方への紹介, 大学院生や PD の方が将来の研究の方向性を考える参考になることなどを念頭としたため, 若干物足りなく感じる方もおられるかもしれないが, そういった「事情通」のみならず, 是非参考文献を参照頂きたい。各節の最後には, そのころ世界はというコラムもつけたので, 「ぜんぶよむのだから」という方も暗黒物質探索のここ 15 年ほどを追いかけて頂きたい。

¹Identification of Dark Matter という, 隔年で行われる暗黒物質研究の国際会議。2006 年は第 6 回だった。

²天文観測での「全天図」に相当するもの。原子核の飛跡をそのまま天球に投影, 暗黒物質の到来方向と視覚的に比較可能とした図。方向に感度を持つ実験としては必須となる図であるが, DRIFT グループはそれまで示していなかった。

³我々のいる太陽系が銀河中を運動する先には白鳥座がある, つまり「暗黒物質の風」が白鳥座の方から吹いてきているように見える, ということからつけられた名前。この名前を冠した第四回の国際ワークショップ「CYGNUS 2013」を 2013 年 6 月 10 日-12 日の日程で, 富山で開催する。詳細は「CYGNUS 2013」で検索を。

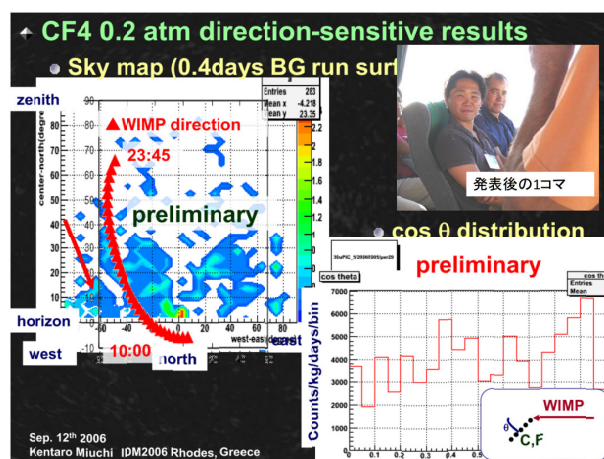


図 1: IDM2006 での身内発表スライドと DRIFT グループのリーダーとの写真 (挿入図)。左図は, 初出となった原子核の飛跡を用いたスカイマップ。三角印で観測時間中の暗黒物質の風の到来方向を示しており, 対応する原子核反跳の方向となす角の余弦分布を右図に示す。

1 実験はおもしろい

プロローグよりさかのぼること約 10 年, 身内は東大みのわ研でフッ化リチウムボロメータを用いた暗黒物質探索実験に参加, 長く続く暗黒世界への第一歩を踏みだした。みのわ研に入ってから最初の正月にみのわ先生から頂いた年賀状には, 一言「実験はおもしろい」と書いてあった。当時は随分とくだけた先生だな, くらいにしか思っていなかったが, 研究を進めて行くうちにどんどんと実験が面白くなってきて, なかなか含蓄のあるお言葉を頂いたなあと思っている。ボロメータ実験では, 色々と失敗しながら学ばせて頂き, 陽子と中性子を別々に考えた場合の暗黒物質との散乱断面積に対して厳しい制限を与える, という内容の博士論文を仕上げることができ

た [1]。博士論文準備中の輪講で紹介した論文 [2] に掲載されていた陽子の飛跡 (図 2) を見たときに、「暗黒物質探索の決め手はこれだ」と思い、博士課程修了後にこうした方向に進む可能性を考え始めた⁴。



図 2: 米国のグループが CCD を用いて検出した陽子の飛跡例 (図全体の大きさが $25 \times 25 \text{ cm}^2$)。低圧ガスでの反跳原子核の飛跡が検出可能で、暗黒物質探索実験に応用可能であることを (おそらく初めて) 示した。文献 [2] の Fig. 2 を引用。

そのころ世界は 1997–2002

身内が大学院に入学したころ、UK グループ [4] や DAMA グループ [3] の NaI を用いた実験が感度の最先端を走っていた。DAMA が計数率の季節変動による暗黒物質検出の主張をしだしたのが 1998 年 [3]、2000 年には DAMA の結果の大部分を CDMS が排除して New York Times で大きく報じられるなど [5]、暗黒物質探索の世界競争が激化する予兆を見せていた。

2 寄らば大樹 ?

身内が博士課程二年の春の学会、ちょうど PD での行き先を考えているときの学会で、京大の谷森教授が MSGC (MicroStrip Gas Chamber) を用いた暗黒物質探索に関しての講演をされていた。「DRIFT の様な実験をしたい。しかもせっかくやるのであれば彼らを上回りたい」と考えていた身内は、学振 PD の受け入れ先として谷森教授に打診、快く了承して頂いた。その時の谷森教授か

⁴輪講の別の回には、DAMA のアニュアルモジュレーションの論文 [3] を紹介、この回には激しく攻められた。その後の国内のさまざまな学会や研究会でも、「DAMA のデータもちゃんとみましょう」といった立場で話をすると、「お前は何で DAMA の肩なんか持つんだよ」と言った調子で随分と議論になった。10 年たった今でもシグナルは消えていないので、暗黒物質かどうかは分からないが、「何か」を見ていることには多くの人に同意していただけるようになってきた。いずれにしても、「輪講」はあなどれない。是非、「問題作」を俎上に上げて盛大に議論すべきである。将来役に立つ、こともある。

らのメールには「寄らば大樹の陰のような最近の大きなグループ中心の研究体制の中、小さくても何とかなるような実験を是非進めたい」という内容のことが書いてあり、こういった考えの教授の元ならば PD としても何か残せるのではないかと期待したのを覚えている。

運よく学振 PD として採用された 2002 年 4 月、すぐにも暗黒物質探索実験を始めることができると思って勇んで京大に乗り込んだが、実際には放電との戦いが待っていた。当時はちょうど MSGC から放電に「圧倒的に強くなった」 μ -PIC (MICRO PIXel Chamber) への移行期⁵、最初のうちは張り付いて実験している必要があった。製造方法を検討するなどの工夫を重ねて、分単位だった連続運転時間が時間単位となり、半年ほどで「夜にデータ取っておく」まで安定した。実用的なサイズとしての 10 cm 角 μ -PIC が安定に動作するようになると、2 次元画像検出器としての動作確認、その次は時間情報も使って TPC (Time Projection Chamber) として動作させて 3 次元飛跡検出器、よし見えた、となったらコンプトンカメラ⁶の原理実証と怒涛のように一年が過ぎた。一連の μ -PIC の初期の開発の様子は参考文献 [6] をご参照頂きたい。

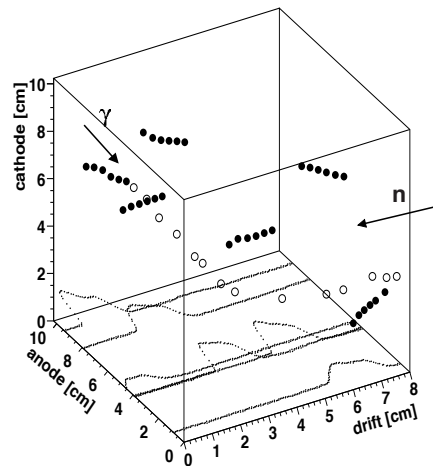


図 3: 10 cm 角の μ -PIC を読み出しに用いたマイクロ TPC で検出された陽子 (黒丸) と電子 (白丸) の三次元飛跡 [7]。それぞれの陽子飛跡の下には、エネルギー検出のためのフラッシュ ADC の波形を示す。マイクロ TPC で、原子核反跳を狙って検出した最初の例である。

さて、 μ -PIC を用いた TPC 「マイクロ TPC」は動作するようになった。これを用いた暗黒物質探索実験を実現するためには、さまざまな開発要素がある。が、当面は一人で何とかして行かねばならない。ということで、

⁵「MSGC」の開発をするものだと思っていたため、大学院生の話す聞きなれない μ -PIC を「身内くん」と聞き間違えて、関西の人は何て失礼なんだろうと思ったこともある。

⁶ガス TPC でコンプトン散乱の反跳電子の飛跡を、取り囲むシンチレータで散乱ガンマ線を検出することでコンプトン散乱を完全に再現するガンマ線カメラ。

まずは

- 反跳された原子核飛跡の検出
- 方向に感度を持つ実験の感度見積り

に焦点を絞って、実験・計算を行うことにした。

反跳された原子核飛跡の検出に関しては、ガス検出器のクエンチャーとして一般的に使われている炭化水素が陽子を含んでおり、中性子線源 ^{252}Cf からの高速中性子で反跳されると大気圧のアルゴンガス中で1~2cm走る、という好条件に恵まれ、比較的すぐに実現された。図3に10cm角のマイクロTPCで検出した陽子の三次元飛跡を示す。

一方、実験感度の見積りに関してはメリットとなる方向情報を用いた感度見積りに合わせて、検出器がガスであるため質量を稼げない、というデメリットをいかにして克服するかという説明が重要だと考えた。

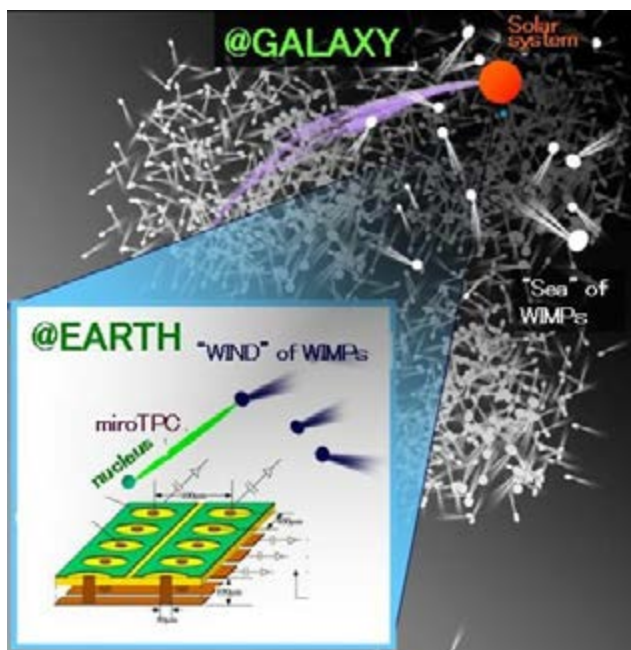


図4: NEWAGE 実験の概念図。銀河に付随してランダムな方向に運動している暗黒物質（図中では Sea of WIMPs と表記）の中を太陽系が運動、太陽系に暗黒物質の「風」が吹き付ける様子を表している。左下の図は、実験室のガス検出器マイクロ TPC の拡大図で、暗黒物質の風によって原子核が前方に反跳されている様子を表している。

メリットは明確である。我々の太陽系には図4に示すように暗黒物質の風が吹き付けており、その到来方向は太陽系の銀河内での運動、地球の公転や自転を考えると簡単に計算できる（プロローグでも述べたが、白鳥座の方向から「暗黒物質の風」が吹いている）。こうした方向性を持つ背景事象は他に考えられないため、図5

に示すように、暗黒物質の到来方向にピークを持つ方向分布を得られれば暗黒物質検出の確実な証拠となる。

デメリットに関しては、方向に感度を持たない「大質量実験」との比較を考えた。大質量実験では、もっともらしい信号は計数率の季節変動である。これは、太陽系の速度と地球の公転速度の関係から、夏では期待される原子核反跳のエネルギースペクトルが高エネルギー側にシフト、エネルギー領域を選べば最大で数%の計数率の変化を得られる。この数%の変化を有意にとらえるためには合計10000事象以上必要であるということが、簡単な統計の計算から導かれる。一方、方向に感度を持つ実験では、図5を例にとると、前方散乱 $\cos\gamma > 0$ が後方散乱 $\cos\gamma < 0$ と比較して10倍以上ある。この分布を一樣分布から見分けるためには、数十事象で十分である。つまり、質量を稼げないガス検出器だが、約3桁少ない統計量で同等に優位な結果を得られる、というのがガス検出器のデメリットに対する説明である。

こうした一連の原理実証と感度計算をまとめて文献[7]として発表、マイクロ TPC を用いた暗黒物質探索実験を開始する意思を示した。

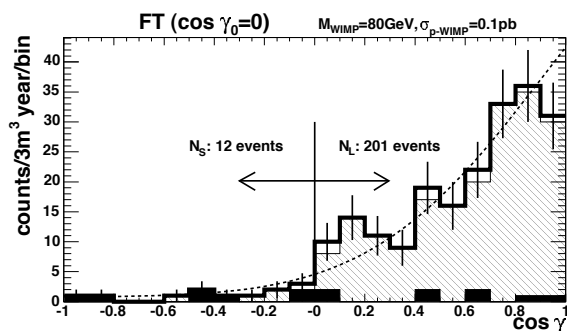


図5: 期待される暗黒物質の特徴的な信号。横軸は原子核の反跳方向と暗黒物質の風の到来方向のなす角の余弦、縦軸は事象数。細実線部分が暗黒物質の信号、黒で塗られた部分は中性子バックグラウンドで太実線で合計をあらわす。陽子と0.1 pbのスピンに依存した散乱断面積を持つ質量80 GeVの暗黒物質に対して見積り[7]。

そのころ世界は2002–2006

この時期は、それまでに最高感度を出していた実験がスケールアップを行うため、感度向上が一段落した感があった。一方で、EDELWEISSがCDMSとほぼ同じ原理でほぼ同じ感度を達成[8]したり、韓国のKIMSグループがスピンに依存した反応断面積で世界最高感度を出す[9]、など「後発」グループが感度を向上させ、次に飛び出すのがどの実験か分からない状況だった。

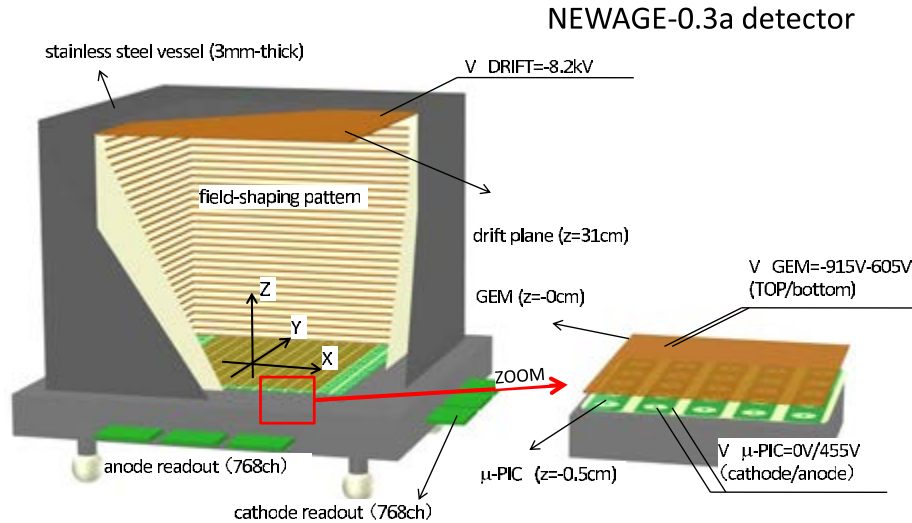


図 6: NEWAGE-0.3a の概念図。左図の $z = 0$ 面から上方に向かって、 $30 \times 30 \text{cm}^2$ の検出面積を持つ μ -PIC, $23 \times 28 \text{cm}^2$ の増幅領域を持つ GEM, 30cm の長さのドリフト領域で構成される。右図は μ -PIC, GEM 部の拡大図および 0.2 気圧の CF_4 ガスでの典型的な印加電圧。

3 NEWAGE !

マイクロ TPC を用いた方向に感度を持つ暗黒物質探索実験の立ち上げに際して、形式「も」を整えるためにインパクトのある名前を検討した。2000 年頃から神岡グループが XMASS 実験を開始しており、日本の暗黒物質実験の中心となることが予想された (XMASS 実験に関しては本号の記事 [10] を参照)。XMASS 実験と並び立ち、相補的な実験として暗黒物質探索実験を日本が牽引して行きたいという思いを込め、クリスマスに対して新年、ならぬ新時代ということで NEWAGE (New generation WIMP-search with Advanced gaseous detector Experiment) と名付けることにした。こうして決めた名前は、2003 年 10 月に京都大学で行われた TEA03 (New direction of particle physics –from theoretical, experimental and astrophysical aspects–) という研究会で初めて世に出した。前後するように概念図 (図 4) やプロモーションビデオ⁷なども製作、アウトリーチにも力を入れてきた。さすがに大学の一助教が始めた実験では、一部の暗黒物質研究者以外ではなかなか世間に認知されず、XMASS との関係については「巨艦に竹やりで向かうようなものだ」などと揶揄されることもあったが、KAMIOKANDE, Super-Kamiokande と続く、方向に感度を持つという「神岡実験」の本質的なところを受けて

⁷海外の CYGNUS コミュニティー研究者からも、研究紹介に活用している等の好評を得ている。

いるという信念のもと、地道に開発を進めてきた。

ガスを用いた暗黒物質探索実験としての最大の課題は大容量検出器の製作である。我々は「 1m^3 クラスの検出器を並べる」ことを想定して開発を開始、第一段階として、10 cm 角の μ -PIC を 30 cm 角に大型化することを考えた。コンプトンカメラのグループと協力して開発を進め、30 cm 角 μ -PIC [11] を読み出しに持つマイクロ TPC “NEWAGE-0.3a” を製作、まずは一般的なガスを用いて基本性能の性能評価を行った [12]。図 6 に検出器 NEWAGE-0.3a の概念図を示す。一般に TPC ではガス中を走る原子核の飛跡の Z 軸方向の飛跡情報を、電場によってゆっくりと検出面に運動させることで時間情報に変換する。NEWAGE-0.3a では、X, Y 軸を直行するストリップ (それぞれ $400 \mu\text{m}$ ピッチ)、さらに時間情報 (100 MHz) で Z 軸の座標情報を得る⁸。こうして得られた「飛跡情報」と、足しあわされたアナログ波形からの「エネルギー情報」が NEWAGE-0.3a で得られる情報である。この 2 つの情報をを用いて、方向に感度を持つ暗黒物質の探索、バックグラウンドの評価や除去などを行う [13, 14]。暗黒物質実験での大きなバックグラウンドとなるガンマ線起源の電子の飛跡を、飛跡長とエネルギーの関係から高効率 ($\sim 10^{-6}$) で除去可能であることは、ガスを使った検出器の大きな特長である。

⁸10 ns ごとにとられる「スナップショット」として時間発展を検出するため、ドリフト速度が $4 \text{cm}/\mu\text{s}$ の速度のガスを用いれば、X, Y, Z の読み出しのピッチが $400 \mu\text{m}$ でそう。

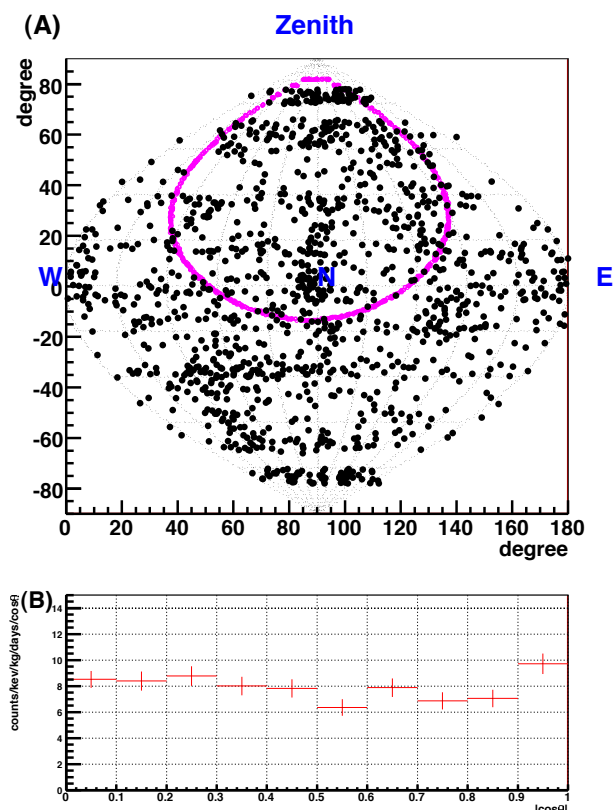


図 7: 地下実験の最初の測定で得られたスカイマップ (上) と暗黒物質の到来方向と原子核反跳方向とのなす角度の余弦分布図。スカイマップの各データ点 (黒色) と、対応する暗黒物質の到来方向 (灰色 (紫) の太線) の余弦を事象ごとに計算, 下図のヒストグラムに示している [16]。

NEWAGE-0.3a を用いた暗黒物質実験として, まずはスピンの依存した反応による探索を進めることとして, 使用ガスを CF_4 と決定, 0.2 気圧で検出器の動作条件を最適化した⁹。スピンの依存しない散乱断面積は使用する原子核の質量数の二乗に比例するため, スピンに依存しない反応による検出を目指す場合はキセノンなど質量数の大きい原子核が選択される。一方, スピンに依存する散乱断面積は不対核子のスピンの効くため, この反応を用いる場合は水素やフッ素などを含む化合物が検出器として選択される¹⁰。その後, エネルギー校正, ガンマ線除去能力測定, 原子核反跳の検出効率測定, 位置及び角度分解能の評価など, 検出器としての基礎的な性能から方向に感度を持つ暗黒物質探索固有の性能評価までを行った。2006 年夏より方向に感度を持つ暗黒物質探索の試験測定を開始, 一部のデータを用いて, プロローグに述べた IDM 2006 に臨んだ。

⁹我々の計算では, 0.05 気圧程度が最適であったが [7], 実際には必要なガスゲインを得ることが難しかった為, 0.2 気圧での立ち上げとなった。

¹⁰その他, 暗黒物質の質量に対する検出器物質の最適化など, [15] を参考にすると一通りの「デザイン」を行うことが可能。

SD 90% C.L. upper limits and allowed region

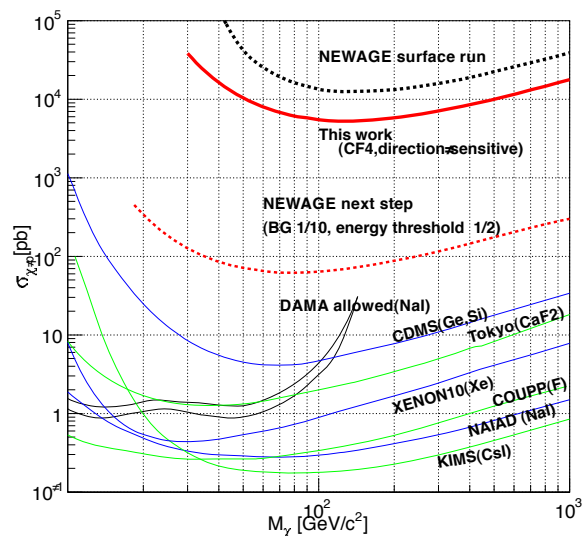


図 8: 地下での最初の測定で得られた制限 ([16] の図に次章で述べる次の測定での期待曲線 (next step と表記) [17] を追加)。横軸に暗黒物質の質量, 縦軸に陽子とのスピンに依存した散乱断面積を記す。赤実線 “This work” で本測定の結果を示す。液体や固体を使った他実験と比べて感度としては劣るが, 方向に感度を持つ制限を更新した。

IDM 2006 での「戦線布告」の後, 2006 年 11 月に世界初となる方向に感度を持つ暗黒物質探索実験を地上の実験室 (京都大学) で行った。この結果を [14] として準備する傍ら, 2007 年 1 月には東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設に装置を移設, 低バックグラウンド条件下での測定を開始した。地下実験は当時京都大学の博士課程 1 年だった西村広展氏を中心として行われた。約 1 年の調整と修正を経て, 2008 年 8 月から 10 月にかけて地下での暗黒物質測定を行った。図 7 に, 地下実験の最初の測定で得られたスカイマップ (上) および暗黒物質の風の到来方向と原子核反跳方向のなす角の余弦分布 (下) を示す。スカイマップには, 測定データのそれぞれの時刻での暗黒物質の到来方向を紫色のマーカーで示す。この結果と, 図 5 に示す様な暗黒物質で期待される信号に検出器応答を考慮した「期待される余弦分布」を比較することで, 暗黒物質と核子の散乱断面積に対しての制限を与えた (図 8)。液体や固体を使った他実験と比べて感度としては劣るが, 方向に感度を持つ制限を更新した。

その後の開発の詳細は次章に譲るが, 「低バックグラウンド化を行い, バックグラウンド低減を確認して, 容積を順次拡大していく」という我々のとるべき基本方針のもとで, 限られたリソース・マンパワーで最大限の結果を得るべく工夫を重ねている。

そのころ世界は 2007–2008

2008年にはXENONグループがガンマ線バックグラウンド除去能力の良さを活かした10kgの液体キセノン検出器で、CDMS実験によって出されていた当時の最高感度を大きく上回った[18]。一方、DAMA実験は検出器を増量、データ取得システムも一新した後のDAMA/LIBRAとしての結果を公表、計数率の年次変化が見え続けていることを示した[19]。方向に感度を持つ暗黒物質探索実験は、第一回国際ワークショップ「CYGNUS 2007」を開催、方向に感度をもつコミュニティーCYGNUSが始動した。

4 だあくまたん

方向に感度を持つ暗黒物質探索において世界初の制限を付けたその先は、ひとえに感度向上である。そんなとき、この章の筆者中村はNEWAGEに参入した。中村はまず、イメージキャラクター「だあくまたん」を作り学会のスライドの片隅にて紹介。学生を中心に次第に認知され、京大に一風変わった暗黒物質探索があることを業界の人々に浸透させていった。

実験に関しては、感度向上のための研究を進めてきた。一つ目はバックグラウンドの除去。冷却した活性炭に μ -TPCのガスを循環して通過させ、重大なバックグラウンドであるラドンガスを除去するシステムを作製した。適切な流量で循環させることで、9割以上のラドン除去率と安定動作を確認した(図9)。

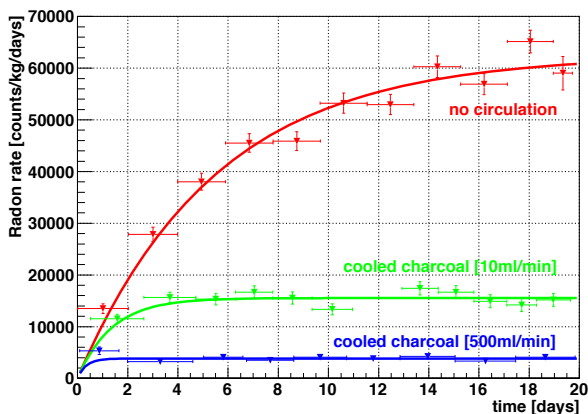


図9: ラドンイベントの時間変化。赤(no circulation)は活性炭なしのとき、緑・青は冷却活性炭を用いポンプ流量がそれぞれ毎分10mlと毎分500mlのときである。

二つ目はエネルギーしきい値の低下。ガス圧を下げるとガス中での荷電粒子の飛跡は長くなり、より低いエネルギーの事象でも方向を見極めることができる。これまでの実験では0.2気圧の CF_4 を用いていたが、新た

に0.1気圧の CF_4 を用いた検出器の性能評価を行った。圧力を半分になると飛跡に沿って発生する電子の密度は半分になり、従来の2倍のガスゲインが必要である。そのため、まず μ -PICやGEMの電圧を変化させながらガスゲインの測定を行い、最適値に調整、2倍のガスゲインに達することを確認した。次に中性子線源 ^{252}Cf を用いて検出器内で原子核反跳事象を起こし、角度分解能の測定を行った。6方向からの中性子照射を行い、等方な原子核反跳に対しての、散乱角の余弦分布を測定した(図10)。Geant4によるシミュレーションとの比較により反跳エネルギーの領域ごとの角度分解能を求め、初めて50-100keVの領域で前方散乱を検出した(図11)。また、シミュレーションとの比較により荷電粒子の検出効率を求め、暗黒物質探索において現実的な検出効率を有することを確認した。以上のことから、低圧ガスを用いることでエネルギーしきい値をNEWAGE-0.3aでの100keVから50keVにできることを示した。暗黒物質の弾性散乱のエネルギースペクトルは指数関数的に減少する形状をしているため、エネルギーしきい値を100keVから50keVに低下させることで感度は約10倍の改善が見込まれる¹¹。

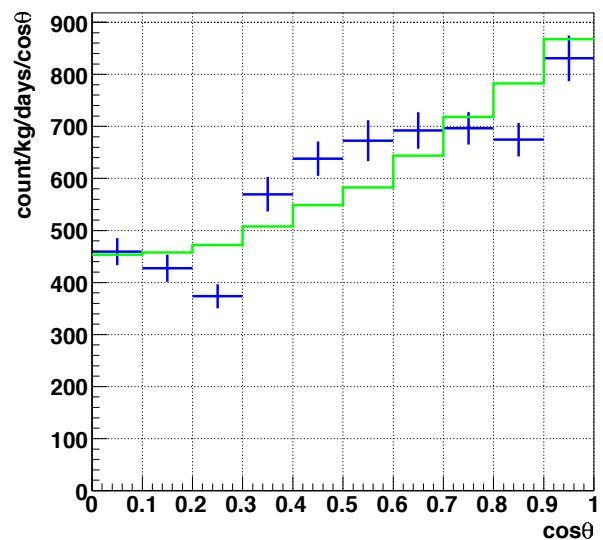


図10: 中性子照射による原子核反跳飛跡の散乱角の余弦分布[17]。エラーバー付きヒストグラム(青)が測定点で、エラーバーなしヒストグラム(緑)はGeant4シミュレーション。エネルギー領域は200–400keV。

三つ目はドリフト長の最適化。ドリフト長が長いとターゲット粒子数が増えるが、電子拡散も増加し角度分解能の悪化につながる。そこで、角度分解能のドリフト長依存を実測、その結果を用いてドリフト長が40cmの

¹¹ここまでの研究成果を参考論文[17]としてまとめ、中村氏は2012年に行われた国際会議MPGD2012で「シャルバック賞」を受賞した。(身内補足)

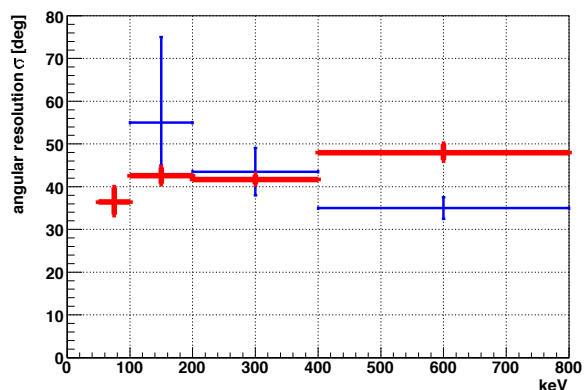


図 11: 角度分解能のエネルギー依存性。太線（赤）が 0.1 気圧のとき、細線（青）が 0.2 気圧のとき [17]。50-100 keV のエネルギー領域で原子核反跳の角度分解能を新たに測定、しきい値を 50 keV に下げることが可能であることを示した。

ときに暗黒物質に対しての感度が最も高くなるという計算結果を得た。ドリフト長の最適化と GEM の大面積化 ($23 \times 28 \text{ cm}^2$ から $30 \times 30 \text{ cm}^2$) を合わせて、現行の検出器 NEWAGE-0.3a (検出容積 $23 \times 28 \times 30 \text{ cm}^3$) と比較して約二倍の検出容積を持つ “NEWAGE-0.3b” (検出容積 $30 \times 30 \times 40 \text{ cm}^3$) を製作、現在試験中である (図 12)。NEWAGE-0.3b では、低バックグラウンド化のためにドリフトケースの材料としてラドン放出の少ない PEEK 素材を用いている。2013 年 3 月には、地上での試験を終えて NEWAGE-0.3b を地下へ導入、ガス循環システム、低圧ガス運用と合わせた観測を予定している。しきい値を 50 keV に低下、しきい値でのバックグラウンド計数率を 1/10 に低減することで図 8 の “NEWAGE next step” で示す感度を達成することを目標としている。

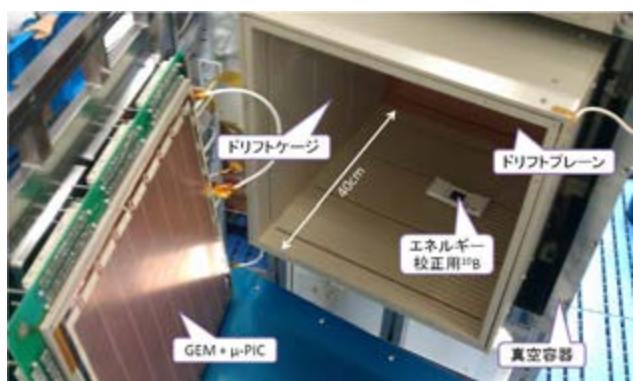


図 12: NEWAGE-0.3b の製作風景。ドリフト長は最適化した 40cm である。

ちなみに、だあくまたんは中村 D 論公聴会のスライドにもこっそり載せる予定なので（もはや隠してない）、気になる人は来年の冬はぜひ京都大学へ。

そのころ世界は 2009–2012

XENON グループは検出器を大型化した XENON100 実験を開始、感度を向上させた [20]。また、2010 年には CDMS II [21] で 2 事象（バックグラウンドの期待値 0.9 ± 0.2 事象）、その後 CoGENT での低質量 WIMP の示唆 [22, 23] や CRESST での 2 桁事象の検出 [24] など、世界的に「騒がしい」状況となっている。これらが暗黒世界への入り口に到達しつつあるサインなのか、みんな「お化け」を見ているだけなのか、今後の展開にご注目頂きたい。

5 To the brand-NEWAGE

さらなる感度向上を見据えて、2007 年より KEK、佐賀大学、東京工業大学、長崎総合科学大学と協力して、ガス TPC のピクセル読み出しを可能とする集積回路「QPIX」の開発を進めている (図 13)。QPIX は、リニアコライダーや暗黒物質探索実験などへの応用を念頭に置いた汎用ピクセル読み出し集積回路である。QPIX の仕様の詳細は参考文献 [25] を参照頂くとして、ここでは NEWAGE の将来計画¹²の感度向上に寄与する特徴をあげておく。

QPIX の第一の特徴は、ピクセル読み出しという点である。ピクセルで読み出すことで、 μ -PIC をはじめとする現行のガス検出器で使用されているストリップ読み出しで問題となるゴースト画像¹³を回避可能となる。計数率の低い暗黒物質実験においても、検出面に水平な飛跡¹⁴の方向決定の不定性を回避可能となる。短い飛跡を検出してしきい値を下げる事が重要な暗黒物質探索実験には、非常に重要な特徴である。

QPIX の第二の特徴かつ他のピクセル読み出し集積回路と比較して秀でている点は、各ピクセルに ADC を搭載している点である。現存するガス検出器用のピクセル読み出し集積回路では TOT (Time-Over-Threshold, しきい値を超えた時間。信号の形状が同じであれば電荷を見積もることが可能。) で ADC の代用とするが、荷電粒子の飛跡の傾き、ドリフト長依存のある縦方向拡散を考えると、TOT のみでは電荷量検出には不十分である。QPIX は ADC, TOT, TOF (Time-Of-Flight, 飛行時間。この場合はトリガーと信号との時間差で、TPC の z 方向の位置情報を得ることが可能。) の三つの情報を検出することで電子雲の形状を三次元的に検出する「究極の」ガス TPC を製作することを可能とする。

¹²brand-NEWAGE (仮称)

¹³計数率の高い実験で X, Y それぞれ複数のストリップが信号を検出した際に組み合わせを一意に決定できない現象。

¹⁴同時刻に X, Y それぞれ複数のストリップで信号を検出するため、ゴーストと同様の問題となる。

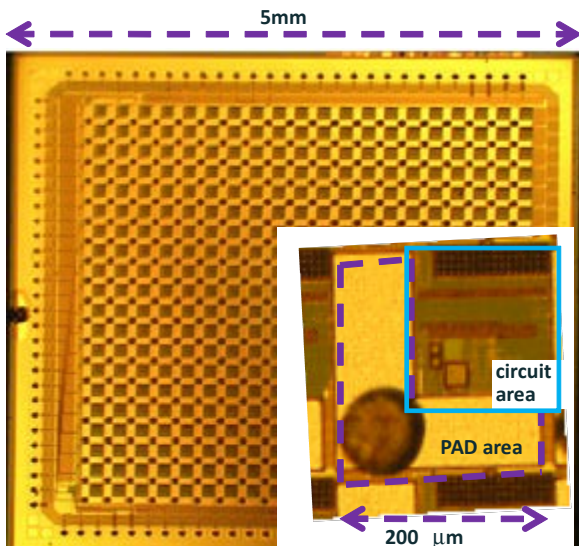


図 13: QPIX-ver1 の顕微鏡写真。200 μm 角のピクセルが 20 \times 20 個のアレイとして配されている。右下は 1 ピクセルの拡大図で 150 μm 角程度の回路部分と L 字型の電荷収集用のパッドを示す。

我々はこれまでに図 13 に示す QPIX-ver1 を製作、回路の電気的試験を行いシステムとして機能していることを確認した。同時に、ガス検出器の読み出しとして実用的なものにするためには電気雑音を約一桁低減することが必要であることを確認、回路を低雑音化した次回作の製作を進めている。QPIX-ver1 の飛跡検出器としての原理実証のため、260 MeV のネオンビームを照射、三次元飛跡と ADC 情報を合わせて検出した (図 14)。システムとしての動作は確認、チップをまたぐような事象の検出も確認できたため、低雑音化によって QPIX は実用的な回路となると考えている。

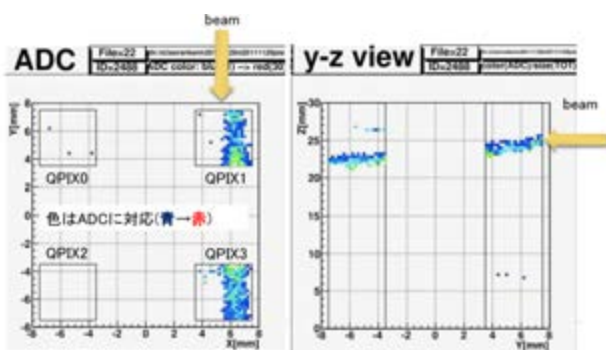


図 14: QPIX-ver1 で検出した重イオンビーム (Ne 260 MeV) の飛跡。三次元の飛跡と各ピクセルでの ADC 値が取得された。

暗黒物質探索実験への応用には、低バックグラウンド、低コスト化といった開発要素が残るが、現行の $\mu\text{-PIC}$ 方式とのベストミックスを検討、暗黒物質探索の世界情勢を鑑みながら NEWAGE の将来計画を臨機応変にデザ

インしてゆきたい。

これから世界は 2013-

現存する検出器としては、XMASS の 800 kg DAMA/LIBRA の 250 kg といったところが、最大質量の検出器である。数年後を目指して 1 桁 2 桁大きい検出器も計画されており、力づくでも事象を得るという方向性は今後も続くと思われる。一方、「何か」見えた後にはこれまでの暗黒物質探索コミュニティが DAMA に対してとってきた姿勢を考えると、季節変動のみでは検出の証拠になりえないというのは明らかだろう。NEWAGE や DRIFT、さらには国際協力の枠組みとしての CYGNUS など、方向感度を持つ検出器で確実な証拠を得るという手法が、今後数年から十数年の大きなトレンドの一つになると確信している。

エピローグ：20 $\chi\chi$ 年ストックホルム

まだ我々の研究は始まったばかり。そんな我々に、エピローグはふさわしくない。いつの日かこんな見出しのエピローグを書きたいな、という願いを込めながら、本稿を閉じたい。

謝辞

本研究を進めてくるにあたり、多くの方にお世話になりました。身内を暗黒世界に引き込んで頂いた蓑輪教授、そして強力な武器を与えて頂いた谷森教授、有難うございます。これまでの同時マンパワーは最大 3 人という、少数精鋭 (!) な NEWAGE 検出器開発に直接携わってくれた、竹田敦氏 (当時 PD)、関谷洋之氏 (当時 PD) 西村広展氏 (当時大学院生) のお三方の助力なくては本稿は成り立たなかったことでしょう。窪助教 (当時)、高田淳史氏をはじめとして、 $\mu\text{-PIC}$ 開発にかかわったみなさま、皆様の開発のおかげで我々は暗黒物質固有の開発に専念することができております。京大宇宙線研究室のみなさま、開発を支えて頂きありがとうございます。神戸大学粒子物理研究室のみなさま、これからよろしくお願ひします。神岡スタッフのみなさま、施設利用でお世話になっております。QPIX 開発チームのみなさま、良いものを作りましょう。 $\mu\text{-PIC}$ 製作に関しては大日本印刷株式会社、GEM 製作に関してはサイエナジー株式会社にお世話になっております。少量不定期というビジネスにならないようなモノですが、今後も我々の夢に是非おつきあい頂きたいと思っております。そして、ここまで (ここから?) 読んで頂いた読者のみなさま。今後、さ

らに感度を向上させていきたいと思っておりますので、みなさまのご支援、ご指導をお願い致します。

参考文献

- [1] K. Miuchi *et al.*, *Astropart. Phys.* **19** (2002) 135.
- [2] K. N. Buckland *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **73** (1994) 1067.
- [3] R. Bernabei *et al.*, *Phys. Lett. B* **424** (1998) 195.
- [4] P.F. Smith *et al.*, *Phys. Lett. B* **293** (1996) 299.
- [5] R. Abusaidi *et al.* (CDMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 5699.
- [6] 永吉 勉, 身内 賢太朗, 窪 秀利, 谷森 達, 高エネルギーニュース **23-1**.
- [7] T. Tanimori *et al.*, *Phys. Lett. B* **578** (2004) 241.
- [8] V. Sanglard *et al.* (EDELWEISS Collaboration), *Phys. Rev. D* **71** (2005) 122002.
- [9] H. S. Lee, *et al.* (KIMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **99** (2007) 091301.
- [10] 小林兼好, 平出克樹, 高エネルギーニュース **31-4**.
- [11] A. Takada *et al.*, *Nucl. Instrm. Methods Phys. Res. Sect. A* **573** (2007) 195.
- [12] K. Miuchi *et al.*, *Nucl. Instrm. Methods Phys. Res. Sect. A* **576** (2007) 43.
- [13] H. Sekiya *et al.*, *Nucl. Instrm. Methods Phys. Res. Sect. A* **573** (2007) 204.
- [14] K. Miuchi *et al.*, *Phys. Lett. B* **654** (2007) 58.
- [15] J. D. Lewin and P. F. Smith, *Astropart. Phys.* **6** (1996) 87.
- [16] K. Miuchi *et al.*, *Phys. Lett. B* **686** (2010) 11.
- [17] K. Nakamura *et al.*, *JINST* **7** (2012) C02023.
- [18] J. Angle, *et al.* (XENON Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 021303.
- [19] R. Bernabei *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **56** (2008) 333.
- [20] E. Aprile, *et al.* (XENON100 Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **105** (2011) 131302.
- [21] The CDMS II Collaboration, *Science* **327** (2010) 1619.
- [22] C.E. Aalseth, *et al.* (CoGENT Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 131301.
- [23] C.E. Aalseth, *et al.* (CoGENT Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 141301.
- [24] E. Behnke *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **72** (2012) 1971.
- [25] K. Miuchi *et al.*, *EAS publication Series* **53** (2012) 33.